

Unsicherheiten bei Richtcharakteristikmessungen

David Pazen*, Ingo Witew, Michael Vorländer

Institut für Technische Akustik, RWTH Aachen, 52056 Aachen, Deutschland, Email: david.pazen@akustik.rwth-aachen.de

* jetzt bei Klinik und Poliklinik für Hals-, Nasen- und Ohrenheilkunde, Kopf- und Halschirurgie, Uniklinik Köln, 50937 Köln

Einleitung

Bei raumakustischen Messungen müssen die Vorgehensweise und die Ausrüstung bestimmte Anforderungen erfüllen, um qualitativ hochwertige Ergebnisse zu erzielen. Diese werden in der ISO 3382 [1] festgelegt, wobei die Richtcharakteristik der zu verwendenden Schallquellen eine wichtige Rolle spielt. In dieser Norm werden ein Verfahren und eine Kenngröße zur Quantifizierung der Richtcharakteristik beschrieben. Die Unsicherheiten dieser Kenngrößen sind jedoch noch nicht untersucht. Dieser Beitrag stellt eine Methode zu deren Ermittlung vor, indem der GUM [2] auf die Messungen von Richtcharakteristiken angewendet wird.

Grundlagen des GUM

Die Qualität eines Messergebnisses kann nur eingeschätzt werden, wenn dessen Unsicherheit mit angegeben wird. Außerdem lässt sich erst mit Kenntnis der Messunsicherheit beurteilen, ob das Testobjekt eine bestimmte Anforderung erfüllt. Mit dem Ziel eine einheitliche und allgemein anerkannte Vorgehensweise zur Ermittlung und Angabe von Messunsicherheiten zur Verfügung zu stellen, hat die ISO den GUM (guide to the expression of uncertainty in measurement) [2] veröffentlicht. Die prinzipielle Vorgehensweise beginnt mit der Definition der Messgröße und der Identifikation aller Eingangsgrößen und deren wechselseitigen Beziehungen. Der Zusammenhang zwischen Eingangsgrößen und Messgröße wird mit einer Modellfunktion beschrieben. Anschließend werden die Schätzwerte der Eingangsgrößen ermittelt und mit entsprechenden Unsicherheitsintervallen beaufschlagt. Zur Berechnung der Unsicherheit der Messgröße als Ausgangsgröße werden die Wahrscheinlichkeitsdichten der Eingangsgrößen durch die Modellfunktion propagiert und zum Unsicherheitsintervall der Ausgangsgröße kombiniert. Dabei ist der Einfluss etwaiger Nichtlinearitäten der Modellfunktion und die Korrelationen aller Eingangsgrößen untereinander zu beachten.

Anwendung des GUM auf Richtcharakteristikmessungen

Zunächst erfolgen die Identifikation der Mess- und Eingangsgrößen sowie die Untersuchung der Messprozedur. Die ISO 3382 schreibt die Messung des abgestrahlten Schallpegels auf einem Großkreis in einer Ebene vor. Der gemittelte Pegel auf dem Großkreis wird mit den Mittelwerten in gleitenden 30° Fenstern verglichen. Die Minima und Maxima der Differenzen dieser Mittelwerte stellen das Kriterium für die Ausprägung der Richtcharakteristik dar.

Neben dieser Kenngröße zeichnen andere Beschreibungen ein detaillierteres Bild von Richtcharakteristiken, beispielsweise die flächengewichtete Standardabweichung der Pegel, wie von

LEISHMAN et. al. [3] beschrieben oder eine Histogrammdarstellung der Pegelabweichungen von einem flächengewichteten globalen Mittelwert [4]. Diese Kenngrößen erfordern eine Voll-Balloon-Messung, wobei die Empfindlichkeiten des Lautsprechers bei einer bestimmten Frequenz in einer bestimmten Messposition gemessen werden. Alle genannten Kenngrößen können also nicht aus einer einzigen Messung gewonnen werden, sondern müssen aus einer Anzahl von einzelnen Messgrößen berechnet werden. Dabei stellen die Lautsprecherempfindlichkeiten die Messgrößen dar, deren Unsicherheit zu ermitteln ist. Die Bestimmung der Richtcharakteristik wird deshalb in zwei Teile unterteilt, eine Messprozedur und die Berechnung der Kenngrößen.

Messprozedur

Gemäß der Definition der Messgrößen stellen die Frequenz und die Messposition, welche durch die örtlichen Eingangsgrößen wie Entfernungen und Winkel definiert ist, die Eingangsgrößen dar. Damit können die Unsicherheitskomponenten in zwei Kategorien eingeteilt werden. Zum einen handelt es sich um verfahrensbedingte Unsicherheiten die z. B. durch Rauschen in der verwendeten Messkette verursacht werden. Diese Unsicherheiten lassen sich empirisch durch wiederholtes Messen ermitteln, wobei die örtlichen Eingangsgrößen konstant bleiben. Die andere Kategorie stellt die Unsicherheiten dar, die vom verwendeten Messaufbau herrühren. Dabei handelt es sich um den Einfluss der Unsicherheiten der örtlichen Eingangsgrößen. Diese werden mittels einer Modellierung des Messaufbaus, z. B. eines Drehtellers, eines Schwenkarms oder beiden ermittelt.

Generell werden mit solchen Apparaturen die jeweiligen Freiheitsgrade von Mikrofon und Lautsprecher realisiert (Abbildung 1), welche deren Startpositionen vor und Bewegungen während der Messung beschreiben. Durch Modellierung der beweglichen Teile der Messapparatur, beispielsweise durch das Aufstellen von Rotations- und Translationsmatrizen oder mit Hilfe der Denavit-Hartenbeg-Parameter, wird eine Modell-

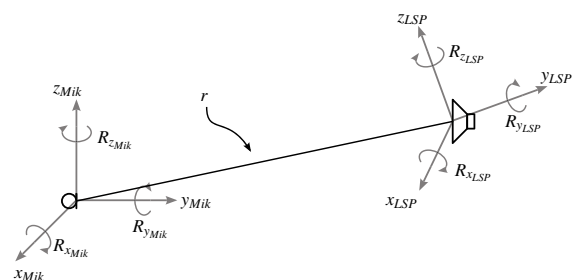


Abbildung 1: Mikrofon und Lautsprecher mit generell sechs Freiheitsgraden, welche ihre relative Position und Orientierung sowie ihre Bewegungen während der Messung beschreiben.

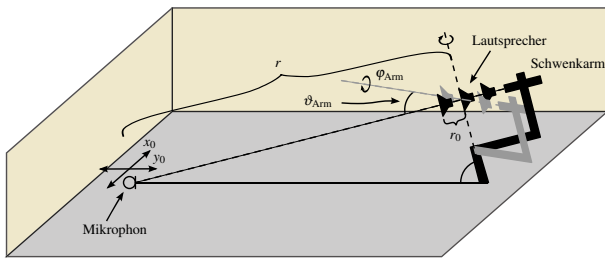


Abbildung 2: Beispiel eines Messaufbaus: Das Mikrofon hat zwei Freiheitsgrade, die seine Startposition beschreiben und der Lautsprecher drei. Diese beschreiben seine Bewegungen während der Messung. r_0 beschreibt die Startposition des Lautsprechers auf dem Schwenkarm.

funktion der Messapparatur gewonnen. Diese Modellfunktion bildet alle veränderlichen Freiheitsgrade von Lautsprecher und Mikrofon auf die Messposition bzw. die örtlichen Eingangsgrößen, z. B. r , ϑ und φ , ab. Abbildung 2 zeigt für einen beispielhaften Messaufbau die veränderlichen Freiheitsgrade des Lautsprechers, der auf einem Schwenkarm montiert ist und des Mikrophons, das auf den Boden des reflexionsarmen Raums gelegt wurde. Die Unsicherheiten der Startpositionen und der durch die Messapparatur realisierten Bewegungen, werden durch eine begrenzte Präzision der Messapparatur und der Montage von Lautsprecher und / oder Mikrofon in der Apparatur verursacht. Sie stellen die Eingangsgrößen für die Modellfunktion der Messapparatur dar und können entweder abgeschätzt oder gemessen werden. Diese Unsicherheiten werden durch die Modellfunktion der Messapparatur propagiert und ergeben die Unsicherheit der Messposition. Dabei werden alle Korrelationen der Eingangsgrößen untereinander berücksichtigt.

Die Auswirkung der Unsicherheit der Entfernung zwischen Lautsprecher und Mikrofon wird mit dem $1/r$ -Gesetz berechnet. Der Einfluss von Fehlausrichtungen, z. B. Unsicherheiten von ϑ und φ , wird mit Hilfe der gemessenen Richtcharakteristik abgeschätzt. Dies kann bei ausreichender örtlicher Auflösung der Messung mit einer Interpolation zwischen den Messwerten in benachbarten Messpositionen erfolgen.

Nach Ermittlung aller Unsicherheitskomponenten (Rauschen, Entfernung, Ausrichtung) werden diese durch quadratische Addition kombiniert. Diesem Ansatz liegt ein lineares Modell zugrunde, das auf Korrekturfaktoren K basiert [5].

Berechnung der Kenngrößen

Die Kenngrößen, wie z. B. die Pegeldifferenzen nach ISO 3382 werden aus den Lautsprecherempfindlichkeiten berechnet. Dazu wird prinzipiell jeder Rechenschritt in einer Modellfunktion ausgedrückt. Dies ermöglicht das Propagieren der Unsicherheiten der Lautsprecherempfindlichkeiten gemäß einer Fehlerfortpflanzung ohne zeitraubende Monte Carlo Simulationen. Hierbei kann die Korrelation der Lautsprecherempfindlichkeiten bei der Zusammenfassung in Frequenzbändern aus den Wiederholungsmessungen zur Bestimmung der verfahrensbedingten Unsicherheitskomponente gewonnen werden. Örtliche Korrelationen, die etwa bei der Mittelung der Messwerte auf einem Großkreis zu beachten wären, wurden nicht berücksichtigt. Deren Einfluss und effiziente Ermittlung oder Abschätzung sollte in Zukunft untersucht werden. Mit Hilfe einer solchen Analyse

der Fehlerfortpflanzung lassen sich auch die Unsicherheiten anderer Kenngrößen ermitteln.

Ergebnisse

Die beschriebene Prozedur ist auf die Messung der Richtcharakteristik eines Hochtönen Dodekaeders angewendet worden. Obwohl die kombinierte Standardunsicherheit der Lautsprecherempfindlichkeiten gerade bei hohen Frequenzen in der Größenordnung von 10 dB liegen kann, ist die Unsicherheit der Pegeldifferenzen nach ISO 3382 kleiner als 0,01 dB. Die flächengewichtete Standardabweichung der Pegel nach LEISHMAN [3] ist mit etwa 10^{-3} dB ebenfalls äußerst gering. Dies ist mit einer großen Anzahl von Messgrößen zu erklären, aus denen die Kenngrößen berechnet worden sind, denn die Messungen sind mit hoher spektraler und 1° örtlicher Auflösung durchgeführt worden. Die Histogrammdarstellungen nach VITALE [4] weisen jedoch eine signifikante Unsicherheit auf, die bei Betrachtung der Richtcharakteristik bei einer einzelnen Frequenz, wenn also keine Zusammenfassung der Messgrößen im Frequenzbereich stattfindet, ein erhebliches Ausmaß annehmen kann.

Fazit und Ausblick

Es wurde gezeigt, wie der GUM auf Richtcharakteristikmessungen angewendet und dabei der zusätzliche Aufwand durch geeignete Modellierungen verhältnismäßig gering gehalten werden kann. Es hat sich gezeigt, dass die Unsicherheit der Kenngrößen einerseits von den Unsicherheiten der Messgrößen (Lautsprecherempfindlichkeiten) abhängt, die zu deren Berechnung verwendet werden. Andererseits beeinflusst die Anzahl der Messgrößen bei der Berechnung der Kenngrößen deren Unsicherheit maßgeblich. Der beschriebene Ansatz kann daher als Grundlage für die Abschätzung des Aufwands dienen, der erforderlich ist, um eine definierte Unsicherheit bei der Beschreibung von Richtcharakteristiken einzuhalten. Außerdem scheint es sinnvoll, diese Vorgehensweise auf Beschreibungen von Schallquellen zu erweitern, die auf der Dekomposition in sphärische Harmonische basieren.

Literatur

- [1] ISO, ISO 3382 – Acoustics – Measurement of the reverberation time - Part 1: Performance spaces, ISO TC 43/SC 2 N 0767 - 2004-06-30, ISO, June 2004.
- [2] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, International Organization for Standardization, Geneva, 1995.
- [3] LEISHMAN, T. W., ROLLINS, S., SMITH, H. M. An experimental evaluation of regular polyhedron loudspeakers as omnidirectional sources of sound, *J. Acoust. Soc. Am.*, 120(2006), 1411-1422.
- [4] VITALE, R. Model for assessing the influence of an omnidirectional source's directivity in room acoustics measurements, *DAGA*, 2009, 963-966.
- [5] WITTSTOCK, V., BETHKE, C. On the uncertainty of sound pressure levels determined by third-octave bandanalyzers in a hemianechoic room, *Forum Acusticum*, 2005.